

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360251

研究課題名（和文）ポーラスコンクリートの3次元幾何学モデルの構築と設計・施工システムへの応用

研究課題名（英文） Study on 3 Dimension Geometrical Modeling of Porous Concrete and Application to Design and Construction

研究代表者

畑中 重光 (HATANAKA SHIGEMITSU)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00183088

研究成果の概要（和文）：本研究では、ポーラスコンクリートの汎用的な理論体系を構築し、品質の安定化を目的とした施工方法および品質管理手法を提案することを目的としている。本研究の結果、強度および揚水に対する幾何学モデルに加え、体積変化特性に対する新しいモデルを提案した。また、ポーラスコンクリートの施工に適した敷き均し機および仕上げ機を試作し、それらの適用性を確認するとともに、エネルギーによる締固め程度の制御手法の提案を行った。最後に、本研究で得られた結果を基に、ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成を行った。

研究成果の概要（英文）：Purpose of the present study is to establish a generalized theory, construction and quality control methods of porous concrete. From the result, a geometrical model of volume change characteristics of porous concrete was successfully proposed, as well as the geometrical models of strength and water pumping ability previously suggested by the authors. A prototype placing machine and a finisher for porous concrete work were devised, and applicability of these machines was evaluated. A method to control compaction performance of porous concrete was proposed by using the concept of vibrating energy. Finally, a construction standard of porous concrete was summarized up, based on the result of this study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：コンクリート工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：ポーラスコンクリート、幾何学モデル、体積変化、品質評価、締固めエネルギー、敷均し機、仕上げ機、施工標準

## 1. 研究開始当初の背景

ポーラスコンクリートは、その内部に多数の連続空隙をもつことにより、普通コンクリートにはない多くの環境対応性能を持つ。既に、一部では実用化され、研究報告

に関しても強度や耐久性だけでなく、透水性舗装や植生基盤などへの適用性も多く報告されているものの、汎用的な理論体系が構築されるには至っていない。これは、ポーラスコンクリートの最大の特徴である多

くの連続空隙の存在により、普通コンクリートの理論体系がそのまま適用できないためである。

ポーラスコンクリートが普通コンクリートと大きく異なる点の1つに、締固めの方法およびその程度によって製品の品質が大きく異なることが挙げられる。すなわち、ポーラスコンクリートでは、調合設計を正確に行い、均一に混練されたとしても、打設後の締固めによっては、締固め過多で空隙が閉塞したり、不十分な締固めにより欠陥部が形成される可能性がある。

以上のような背景から、ポーラスコンクリートの設計および品質評価に対する理論体系の構築と、高品質なポーラスコンクリートを製造するための施工標準の作成が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的を以下に列挙する。

### (1) 汎用的な理論体系の構築

ポーラスコンクリートの空隙構造を再現するために、3次元の幾何学モデルによる内部構造の定式化を行い、強度性能、透水性能、揚水・保水性能、耐摩耗性能などの諸性能を統一的に評価・予測することのできる汎用理論の構築を目指す。

### (2) 品質の安定化を目指した施工方法および品質管理手法の提案

ポーラスコンクリートの敷均し、締固めおよび仕上げを行うことのできる装置を開発し、欠陥を未然に防ぐことのできる施工システムの開発を試みる。

## 3. 研究の方法

本研究では、ポーラスコンクリートの幾何学モデルの構築、および安定した施工システムの開発に関する理論的および実験的研究を並行して進めることで、より効率的に研究成果を得ることを目指す。

## 4. 研究成果

### (1) ポーラスコンクリートの体積変化特性のモデル化

本研究では、ポーラスコンクリートの乾燥収縮および熱膨張に起因した体積変化特性の定量化およびモデル化を目的として、広範囲な調合・材料条件のポーラスコンクリートを作成し、実験的な検討を行った。図-1に、各種骨材を用いたポーラスコンクリートの乾燥収縮挙動の一例を示す。

実験の結果からは、ポーラスコンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートと比べて早く進み、最終の収縮率は $300\sim 700\times 10^{-6}$ 程度と、同種の材料を用いた普通コンクリートよりも小さくなる結果となった。また、ポーラスコンクリートの最終収縮率に対しては、骨

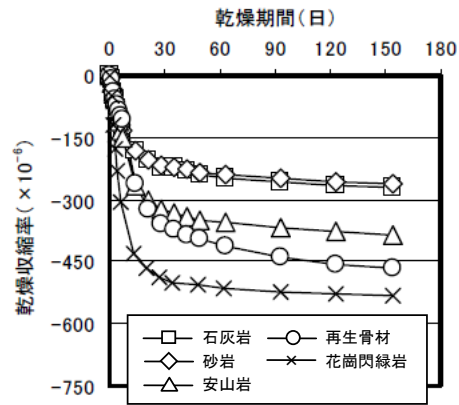


図-1 ポーラスコンクリートの乾燥収縮曲線の例

材の岩種が大きく影響を及ぼし、一方で、締固めの程度は、図-2に示すようなメカニズムにより乾燥収縮率に影響を及ぼさないことなどが明らかとなった。

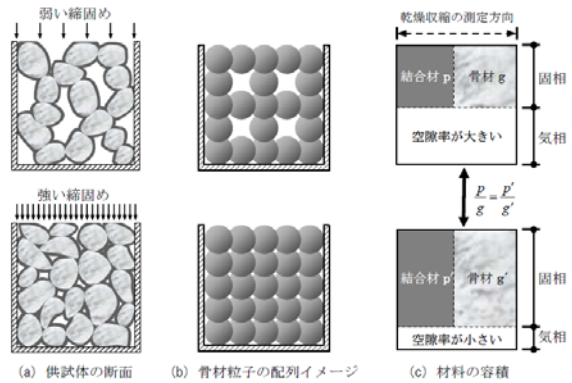


図-2 締固めの程度の違いによる骨材の配列と各材料の容積比の変化

以上のような結果に基づき、乾燥収縮挙動に関する理論モデルおよび予測式の提案を行った。通常、ポーラスコンクリートのような粒子集合体の幾何学モデルを検討する場合には、図-3に示すような格子配列を考慮して行う必要がある。過去に提案した強度や揚水性に関する格子モデルでは、実際はランダムな配置の粒子に対して、ある程度これらの格子の形状を限定して理論モデルを構築する必要がある点が問題となっていた。これは、いずれも空隙率または空隙径などを評価する必要があったためである。

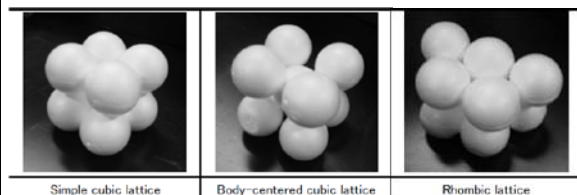


図-3 3次元幾何学モデルの格子配列の例

これに対して、乾燥収縮モデルでは、空隙の及ぼす影響は極めて少なく、硬化体内部の材料の比率により乾燥収縮率が決定されることが明らかとなったため、図-4に示すよう

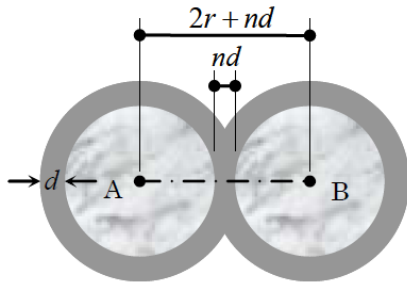


図-4 乾燥収縮特性の幾何学モデル

な、2つの理想球体の中心間距離により評価することのできる全く新しいモデルの構築が可能となった。以下に、提案したポーラスコンクリートの乾燥収縮モデルの概要を示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{POC_{\infty}} &= \varepsilon_{POC_{-p}} + \varepsilon_{POC_{-g}} & (1) \\ \varepsilon_{POC_{-p}} &= \frac{nk}{nk+2} \cdot \varepsilon_p & (2) \\ \varepsilon_{POC_{-g}} &= \frac{2}{nk+2} \cdot \varepsilon_g & (3) \\ k &= \left(\frac{p}{g} + 1\right)^{1/3} - 1 & (4) \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon_{POC_{\infty}}$ ：ポーラスコンクリートの最終乾燥収縮率 ( $\times 10^{-6}$ )、  
 $\varepsilon_{POC_{-p}}$ ：結合材の乾燥収縮による乾燥収縮率 ( $\times 10^{-6}$ )、  
 $\varepsilon_{POC_{-g}}$ ：骨材の乾燥収縮による乾燥収縮率 ( $\times 10^{-6}$ )、  
 $k$ ： $p/g$  で決定する係数、  
 $d$ ：結合材の膜厚 (mm)、  
 $n$ ：膜厚  $d$  に対する倍率(本実験の平均値 3.4)、  
 $p$ ：結合材の単位容積 ( $m^3/m^3$ )、  
 $g$ ：骨材の単位容積 ( $m^3/m^3$ )

図-5に、ポーラスコンクリートの最終収縮率に関する実測値と本モデルによる推定値の比較を示す。骨材粒子形状および粒度分布などの不確定な要素に対する近似定数として、 $n=3.4$ を用いているが、比較的良好的な推定精度が得られているといえる。また、別途行った熱膨張係数に関する検討に対しても、本実験の範囲では、含めて本モデルがそのまま適用できることが明らかとなり、 $n$ の値も含めて本モデルの妥当性が確認されたと考えられる。

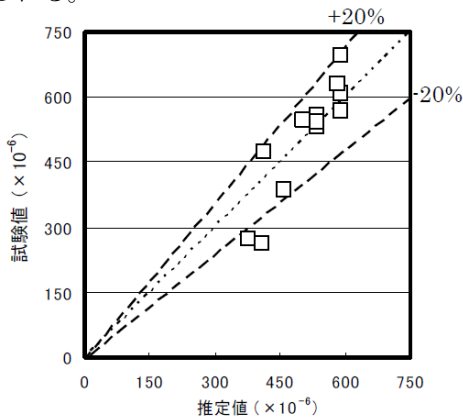


図-5 ポーラスコンクリートの乾燥収縮率の推定結果と測定結果の比較

本研究期間中に、各種の特性に対する幾何学モデルがそれぞれ整備されたが、現時点ではこれらを統一的に議論するためのモデルの提案には至っていない。今後も継続的な研究を行い、モデルの整備を進めていく予定である。

(2) ポーラスコンクリートの施工システムの開発

i) ポーラスコンクリート舗装の施工実験

ポーラスコンクリートの施工システムを開発する前段階として、既存技術を用いた実施工実験を行い、施工に関する問題点の抽出および施工されたポーラスコンクリートの品質評価を行った。写真-1に施工風景を、写真-2に完成したポーラスコンクリート舗装を示す。



(a) ポーラスコンクリートの打設状況



(b) 市販の振動機による締固め状況

写真-1 ポーラスコンクリート舗装の施工状況



写真-2 施工後の複層ポーラスコンクリート舗装(右上はコア供試体の採取状況)

施工実験の結果からは、施工方法および品質評価方法に関する問題点が明らかとなった。

ii) ポーラスコンクリート用施工機械の開発  
 実施工実験の結果を基に、施工の省力化、および施工品質の安定化が可能なポーラスコンクリート用の施工機械の開発を行った。写真-3 にポーラスコンクリート用敷均し機を、写真-4 にポーラスコンクリート仕上げ機を示す。



写真-3 ポーラスコンクリート敷均し機



写真-4 ポーラスコンクリート仕上げ機

実施工実験に基づく性能評価試験の結果、敷均し機については敷均しの性能自体には問題はないものの、取回しが悪い点が改善の余地有りだと判断された。仕上げ機に関しては、起振力の異なる装置により比較を行った結果、起振力ごとの締固め性能の違いが明らかとなり、締固めエネルギーにより概ね締固め程度が制御できることなどが明らかとなった。

(3) ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成に向けた検討内容

2003年に発刊された、ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書に掲載されている施工指針(案)に関して、修正の必要があると考えられる内容に対して検討した結果の一部を以下に示す。

i) 品質管理用供試体の作成方法

現状の指針(案)では、円柱型枠にポーラスコンクリートを打設することを前提とした記述がなされているが、実施工されたポーラスコンクリートに対して円柱供試体では、①実際の締固めとの相違、②型枠の壁効果、などの問題が生じるといえる。一方で、コア供試体を用いた場合は、円柱供試体の際にはあまり問題とならなかった③供試体の高さhと

直径dとの比(以下、高さ直径比h/dと略記)の影響について考慮する必要がある。表-1に、円柱供試体とコア供試体の相違点をまとめて示す。

表-1 円柱供試体とコア供試体の相違点

	円柱供試体	コア供試体
概念図		
①実際の締固めとの相違	あり	なし
②壁効果*1	あり	なし
③供試体の高さ直径比 h/d	一定	様々
コア抜き作業	なし	あり
その他	スラブを傷つけない	スラブを傷つける

注) \*1: 壁効果には幾何学的効果と力学的効果があるが、ここでは幾何学効果を意味する。

実施工実験の結果からは、同一の調(配)合のポーラスコンクリートを用いたとしても、円柱型枠を用いて作成された供試体は、上記①および②の影響により、実際に施工されたポーラスコンクリートとは別のポーラスコンクリートと判断するのが妥当であり、実施工における品質評価試験には適さないことが示された(ただし、実験室において円柱試験体に関する試験を行う場合にはこの限りではない)。以上の結果から、この問題に対する現状での最良の対策は、現場で採取されたコア供試体を用いて品質評価を行うことと判断された。

一方で、③のコア供試体の高さ直径比 h/d が一定でないことに関する問題に対しては、圧縮強度に対する影響を実験的に確認し、図-6に示すような補正係数を提示した。

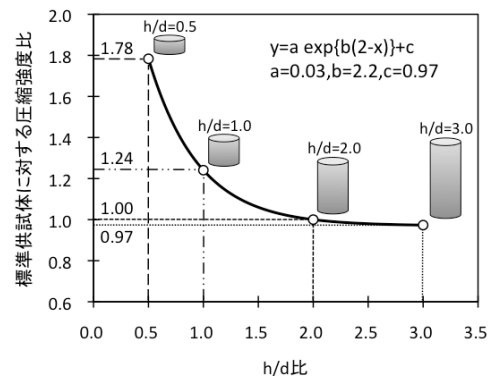


図-6 標準供試体に対する圧縮強度比と h/d 比との関係

ii) ポーラスコンクリートの締固め

現状の指針(案)では、「締固めは、所定の品質が確保されるように適切な方法で実施しなければならない。」と言った記述で、施工者は具体的にどのような締固めをどの程度行えば、所定の品質(特に空隙率)が得られるのか不明である。筆者らは、このような問題を踏まえ、施工者にとってより明解な締固め方法(すなわち、空隙率の制御方法)について検討を重ねてきた。本研究では、既往の研究で使用されていた振動締固めに対するひとつの指標である振動締固めエネルギーに着目し、ポーラスコンクリート仕上げ機の重量や起振力を変化させ、振動締固めエネルギーを用いて空隙率の制御が可能であるか検討を行った。その結果、図-7に示すような締固め率(設計上の充填率に対する実際に施工されたときの充填率の比率)と振動締固めエネルギーの関係を示し、空隙率生業に対する基本的な考え方を示した。

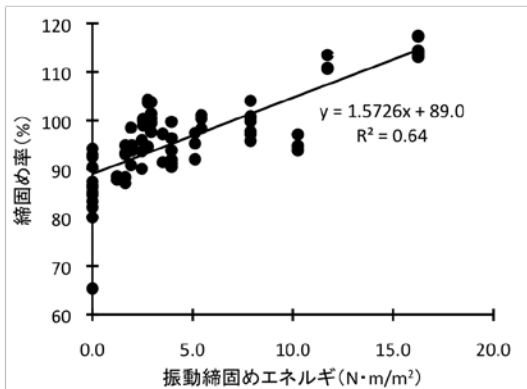


図-7 締固め率と振動締固めエネルギーの関係

また、ポーラスコンクリートは過剰に締固めを行うと下面に結合材の垂れを生じさせる。結合材の垂れが生じると、底部では空隙が閉塞し透水性を低下させ、上部では結合材の減少により空隙率が上昇し、圧縮強度を低下させるなどの問題が発生する。これに対しても、図-8に示すようなスラブ状

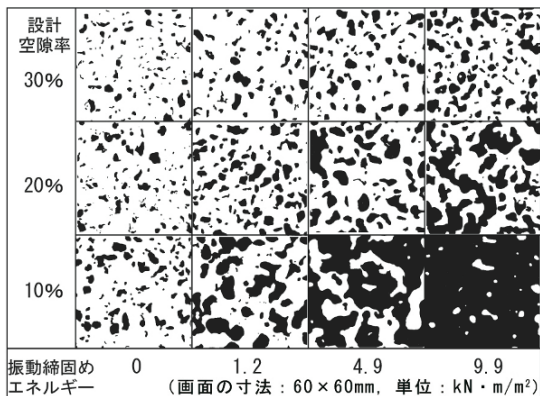


図-8 振動締固めエネルギーとスラブ底面の結合材の垂れ (スラブの寸法: 550×650×200mm、結合材のフロー値 190)

のポーラスコンクリート供試体を用いた実験的な検討により、底部の結合材の垂れを防ぐための振動締固めエネルギーの許容値を示した。

(4) その他の研究

本申請研究では、この他に、空隙率の効率的な測定方法や、初期養生条件が強度特性に及ぼす影響、凍害・目詰まりなどの耐久性、夏季の路面温度低減効果など、幅広い研究を行い、成果を得ている。詳細に関しては後掲の文献を参照されたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

- 1) 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの実施工における敷均しおよび仕上げ方法が空隙率に与える影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 32、No. 1、pp. 1397-1401、2010. 6
- 2) 中川武志、畑中重光、三島直生：供試体の高さ/直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 75(650)、pp. 695-699、2010. 4
- 3) 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその予測式に関する研究、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 75(647)、pp. 25-31、2010. 1
- 4) P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, N. Mishima, Y. Yuasa and T. Chareerat : Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete, International journal of Minerals, Metallurgy and Materials , 査読有, Vol. 16 (6), pp. 714~719, 2009. 12
- 5) 中川武志、畑中重光、三島直生：意匠性および施工性を考慮した複層ポーラスコンクリート歩道施工実験、建設機械、査読無、Vol. 45(10)、pp. 46-51、2009. 10
- 6) Sunil PRADHAN, Naoki MISHIMA, Shigemitsu HATANAKA : Study on Clogging and Permeability of Porous Concrete, 4th International Conference on Construction Materials, 査読有, pp. 269 -274, 2009. 8
- 7) 張茂剛、三島直生、畑中重光：直列モデルを用いたポーラスコンクリートの熱膨張特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 31 (1)、pp. 1729-1734、2009. 7
- 8) Sunil PRADHAN, Naoki MISHIMA, Shigemitsu HATANAKA : Effect of

Clogging on Permeability of Single and Double Layered Porous Concrete, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 査読有, 31(1), pp. 1735 - 1740, 2009.7

- 9) 畑中重光、三島直生、坂本英輔、前川明弘：小粒径ポーラスコンクリートの揚水モデルの構築に関する研究、セメントコンクリート、査読無、No. 743, pp. 46-51、2009.1
- 10) 中川武志、畑中重光、三島直生、松村豪：住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験、コンクリート工学、査読無、Vol. 46(12)、pp. 20-27、2008.12
- 11) 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその定式化に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 30(2)、pp. 277-282、2008.6
- 12) 三島直生、中川武志、畑中重光、北野博亮：屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 30(3)、pp. 1291-1296、2008.6
- 13) 中川武志、畑中重光、三島直生、湯浅幸久、前川明弘：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法、日本建築学会構造系論文集、査読有、Vol. 73(627)、pp. 693-700、2008.5

[学会発表] (計 15 件)

- 1) 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：実施工におけるポーラスコンクリートスラブの品質管理に関する一考察、日本建築学会東海支部研究発表会 (椋山大学・愛知県)、2011.2.19
- 2) 河合純、森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：実施工におけるポーラスコンクリートスラブの締固めに関する基礎的研究、日本建築学会東海支部研究発表会 (椋山大学・愛知県)、2011.2.19
- 3) 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの圧縮強度および弾性係数に及ぼす乾燥養生の影響、日本建築学会大会 (富山大学・富山県)、2010.9.10
- 4) 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの実施工における敷均しおよび仕上げ方法が空隙率に与える影響、日本建築学会大会 (富山大学・富山県)、2010.9.10
- 5) 前川明弘、三島直生、張茂剛、畑中重光：小粒径ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的実験、日本建築学会東海支部研究発表会 (名古屋大学・愛知県)、2010.2.20

- 6) 中川武志、森鼻泰大、三島直生、畑中重光：敷均しおよび仕上げ方法が実測空隙率に与える影響に関する基礎的研究、日本建築学会東海支部研究発表会 (名古屋大学・愛知県)、2010.2.20
  - 7) 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの空隙率の測定値に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会東海支部研究発表会 (名古屋大学・愛知県)、2010.2.20
  - 8) 森鼻泰大、中川武志、三島直生、畑中重光：実施工における舗装用ポーラスコンクリートの諸特性に及ぼす締固め方法の影響、日本建築学会大会 (東北学院大学・宮城県)、2009.8.27
  - 9) 三島直生、中川武志、北野博亮、畑中重光：底面を水中に浸漬させたポーラスコンクリートの熱特性に関する実験的研究、日本建築学会大会 (広島大学・広島県)、2008.9.19
  - 10) 張茂剛、三島直生、畑中重光：ポーラスコンクリートの熱膨張特性に関する基礎的研究、日本建築学会大会 (広島大学・広島県)、2008.9.19
- (他 5 件)

## 5. 研究組織

### (1) 研究代表者

畑中 重光 (HATANAKA SHIGEMITSU)  
三重大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00183088

### (2) 研究分担者

三島 直生 (MISHIMA NAOKI)  
三重大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30335145

### (3) 研究協力者

湯浅 幸久 (YUASA YUKIHISA)  
財団法人三重県産業支援センター・主幹  
前川 明弘 (MAEKAWA AKIHIRO)  
三重県工業研究所・ものづくり研究課・主幹研究員  
中川 武志 (NAKAGAWA TAKESHI)  
(株)ファイナルマーケット・代表取締役  
Prinya Chindaprasert  
タイ コンケン大学・教授  
Thanudkji Chareerat  
タイ カセサート大学・講師